

Vysoká škola báňská- Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetických zařízení

Spalování radioaktivních odpadů

Combustion of Radioactive Waste

Student:

Jiří Fogaraši

Vedoucí práce:

Prof.Ing.Pavel Kolat, DrSc

OSTRAVA 2012

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....
podpis studenta

Zadání bakalářské práce

Student: **Jiří Fogaraši**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3907R009 Provoz energetických zařízení
Téma: **Spalování radioaktivních odpadů**
Combustion of Radioactive Waste

Zásady pro vypracování:

Na základě rešerže vypracujte návrh spalovny nízkoaktivních odpadů z jaderných elektráren. Vypracujte koncepční návrh spalovny odpadů. Popište hlavní části, jejich funkci, spalovací a dohořivací komoru. Proveďte rešerši této problematiky u výrobců spaloven. Specifikujte podmínky doporučené pro provoz a konstrukci zařízení i u nebezpečného odpadu. Uveďte výsledky spalování modelového a radioaktivního odpadu na základě měření. Proveďte zjednodušený výpočet spalovací komory vybavené stabilizačním hořákem. Proveďte rozbor z hlediska ochrany ovzduší a navrhnete technologie pro čištění spalin.

Zadané parametry:

Výkon spalovny 50 kg/hod;
výhřevnost odpadů 15 – 35 MJ/kg.

Grafická část bude obsahovat:

1. Schéma spalovny radioaktivních odpadů.
2. Schéma spalovací a dohořivací komory.


Seznam doporučené odborné literatury:

HEJZLAR, Radko. *Stroje a zařízení jaderných elektráren*. Díl 1 a 2. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. 385 s. ISBN 80-01-03189-6.
MÁTAL, Oldřich. *Jaderné reaktory a jejich chlazení*. Nakladatelství CERN VUT v Brně. 2001. 116 s. ISBN 80-214-2028-6.
HEZOUČKÝ, František. *Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory*. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. 185 s. ISBN 80-01-03324-4.

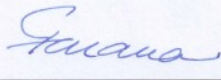
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 16.12.2011
Datum odevzdání: 21.05.2012


prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat prof. Ing. Pavlovi Kolatovi, DrSc. za jeho rady a připomínky. Dále bych zmínil ing. Jiřího Kotáska, vedoucího spalovny komunálních odpadů v Malenovicích, který mě provedl provozem a rovněž mi pomohl svým výkladem a radami.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat svojí rodině, za morální a materiální podporu po dobu mého studia.

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :

.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Adresa trvalého pobytu autora práce:

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Fogaraši, J. *Spalování radioaktivního odpadu : bakalářská práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky 361, 2012, Vedoucí práce: Kolat, P

Bakalářská práce se zabývá spalováním radioaktivního odpadu. V úvodu definuji specifika radioaktivního odpadu a jeho třídění dle různých vlastností. Práce dále obsahuje popis zařízení na spalování radioaktivních odpadů a způsob jak se proces spalování technologicky řeší v praxi. Rovněž zmiňuji technologie čištění spalín. Nakonec uvádím zjednodušený výpočet návrhu dohořivací komory na základě udané výhřevnosti paliva.

ANOTATION OF THE BACHELOR THESIS

Fogaraši, J. *Combustion of Radioactive Waste : bachelor thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energetic 361, 2012, Thesis head: Kolat, P.

Bachelor work deals with combustion of radioactive waste. In the introduction i define the spicifics of radioactive waste and classification by their various properties. The work also contains a description of equipment to combustion radioactive waste and a way to solve this technology in practice. As well i mention technology of flue gas cleaning. Finally I calulate the proposal of afterburn chamber based on the declared calorific value of fuel.

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ	1
1. Úvod.....	3
2. Radioaktivní odpad	4
2.1. Klasifikace odpadů dle radioaktivity	4
2.1.1. Přechodné odpady.....	4
2.1.2. Velmi nízko aktivní odpady.....	4
2.1.3. Nízko aktivní odpady.....	4
2.1.4. Středně aktivní odpady	5
2.1.5. Vysokoaktivní.....	5
2.2. Dělení odpadu dle skupenství.....	5
2.2.1. Plynné odpady	5
2.2.2. Kapalně odpady	5
2.2.3. Pevné odpady.....	6
3. Spalování radioaktivních odpadů.....	7
3.1. Způsoby spalování RAO	7
3.2. Spalovací pec	9
3.3. Podmínky spalování	9
4. Cesta spalin	11
5. Čištění spalin.....	12
5.1. Sušení odsířovacích roztoků.....	13
5.2. Jemná filtrace.....	14
6. Výpočty.....	16
Přivedená energie v palivu	16
$PP = mp \cdot Qi, or = 0,014 \cdot 20 = 0,28 \text{ MW}$ (6.1).....	16
6.1. Stechiometrické výpočty	16
6.1.1. Minimální objem spalovacího vzduchu suchého.....	16
6.1.2. Minimální objem spalovacího vzduchu vlhkého	16

6.1.3.	Minimální objem spalin suchých.....	16
6.1.4.	Množství vody ve spalinách	17
6.1.5.	Minimální objem spalin vlhkých	17
6.1.6.	Skutečný objem spalovacího vzduchu.....	17
6.1.7.	Skutečný objem spalin vlhkých	17
6.1.8.	Objemový tok spalin.....	17
6.1.9.	Spalování zemního plynu	17
6.1.10.	Minimální objem spalovacího vzduchu pro plyn	18
6.1.11.	Množství jednotlivých složek spalin	18
6.1.12.	Minimální množství spalin ze spalování plynu	18
6.1.13.	Skutečný objem spalin ze spalování zemního plynu	18
6.1.14.	Objemový tok spalin ze spalování plynu.....	18
6.2.	Průtoky spalin a vzduchů spalovací pecí.....	18
6.2.1.	Průtok Spalovací komorou	18
6.2.2.	Průtok dohořivací komorou	19
6.2.3.	Celkový průtočný objem spalovací pecí.....	19
6.2.4.	Průtočné objemy v obou komorách	19
6.2.5.	Směšovač	19
6.2.6.	Průtočné objemy vlhkých spalin.....	19
6.2.7.	Objem spalin v dohořivací komoře	19
6.3.	Návrh velikosti dohořivací komory.....	20
6.3.1.	Rozměry dohořivací komory	20
6.3.2.	Objem dohořivací komory	20
6.3.3.	Zdržení spalin dohořivací komoře	20
7.	Závěr	21

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

H^r	[-]	Procentualní množství vodíku v odpadu
P_p	[W]	Příkon energie v palivu
T_N	[K, °C]	Teplota za normálních podmínek
T_{sp}	[K, °C]	Teplota spalin v dohořivací komoře
$Q_{i,o}^r$	[MJ/kg]	Výhřevnost odpadu
$Q_{i,p}^r$	[MJ/kg]	Výhřevnost zemního plynu
W^r	[-]	Procentualní množství vody v odpadu
V_{dk}	[m ³]	Objem dohořivací komory
V_{H_2O}	[m ³ /kg]	Objem vody v odpadu
V_{O_2}	[m ³ /kg]	Objem kyslíku potřebný ke spálení zemního plynu
$V_{sp,min}^s$	[m ³ /kg]	Minimální objem spalin suchých z odpadu
$V_{sp,min}^v$	[m ³ /kg]	Minimální objem vlhkých spalin z odpadu
$V_{sp,min,p}^v$	[m ³ /kg]	Minimální objem vlhkých spalin z plynu
$V_{sp,sk}^s$	[m ³ /kg]	Skutečný objem suchých spalin z odpadu
$V_{sp,sk,p}^v$	[m ³ /kg]	Skutečný objem vlhkých spalin z plynu
$V_{vz,min}^s$	[m ³ /kg]	Minimální množství suchého spalovacího vzduchu pro odpad
$V_{vz,min}^v$	[m ³ /kg]	Minimální množství vlhkého spalovacího vzduchu pro odpad
$V_{vz,min,p}^s$	[m ³ /kg]	Minimální objem suchého spalovacího vzduchu pro plyn
$V_{vz,min,p}^v$	[m ³ /kg]	Minimální objem vlhkého spalovacího vzduchu pro plyn
\dot{V}_{sp}	[m ³ /s, m ³ /hod]	Objem spalin v dohořivací komoře
$\dot{V}_{sp,celk}$	[m ³ /s, m ³ /hod]	Celkový průtočný objem spalin spalovacím zařízením
$\dot{V}_{sp,o}^v$	[m ³ /s, m ³ /hod]	Objemový tok vlhkých spalin z odpadu

$\dot{V}_{sp,p}^v$	$[m_N^3/s, m_N^3/hod]$	Objemový tok vlhkých spalín plynu
$\dot{V}_{vz,celk}$	$[m_N^3/s, m_N^3/hod]$	Průtočný objem vzduchu spalovacím zařízením
$\dot{V}_{vz,dk}$	$[m_N^3/s, m_N^3/hod]$	Objemový tok vzduchu dohořivací komorou
$\dot{V}_{vz,sk}$	$[m_N^3/s, m_N^3/hod]$	Objemový tok vzduchu spalovací komorou
$\dot{V}_{vz,sk+dk}$	$[m_N^3/s, m_N^3/hod]$	Průtočný objem vzduchu spalovací a dohořivací komorou
$\dot{V}_{vz,směs}$	$[m_N^3/s, m_N^3/hod]$	Průtočný objem vzduchu směšovačem
\dot{V}_{zp}	$[m_N^3/s, m_N^3/hod]$	Objemový tok plynu plynu do hořáku
d	[m]	Průměr dohořivací komory
m_p	$[kg/s][kg/hod]$	Hmotnostní tok odpadu
n	[-]	Celkový přebytek vzduchu
n_{dk}	[-]	Přebytek vzduchu pro dohořivací komoru
n_p	[-]	Přebytek vzduchu pro plyn
n_{sk}	[-]	Přebytek vzduchu pro spalovací komoru
v	[m]	Výška dohořivací komory
ν	[-]	Součinitel vlhkosti v ovzduší
τ_{sp}	[s]	Čas setrvání spalín v dohořivací komoře

1. Úvod

Odpad je nedílnou součástí dnešní doby. Vzniká takřka v každém oboru lidské činnosti. Radioaktivní a nebezpečné odpady tvoří zvláštní skupinu a vyžadují speciální zacházení. Vznikají nejen z jaderných elektráren, i když z nich je převážná část, ale rovněž z výzkumu, zdravotnictví a průmyslu.

Než se o zpracování dozvíme něco více, je třeba zmínit proč tyto odpady zpracovávat a ukládat. Radioaktivní odpady (dále jen RAO) vyzařují, pro živé organismy nebezpečné záření, které je, dá se říct smrtelné. Definují se bezpečné dávky a je důležité, aby nepřišly do přímého styku s životním prostředím. Toto ošetřuje zákon České republiky o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření se musí všechny činnosti při zacházení s radioaktivními odpady směřovat k jejich bezpečnému uložení.

RAO je třeba skladovat a tudíž je snaha co nejvíce snížit jeho objem, jelikož vybudované sklady mají omezené kapacity. Tato úložiště jsou nákladná vzhledem k nutným inženýrským bariérám. Cíl číslo jedna v odpadovém hospodářství je nejspíše to, aby žádný nevznikal, či snad co nejméně. Dokud ovšem bude vznikat, prioritou je jeho maximální objemová redukce. Těto dosáhneme jeho spálením. Pokud je možno odpad spálit, výsledný produkt, tedy popel, poskytuje ideální vlastnosti pro jeho skladování. Jsou i další možnosti jako lisování, odpařování, filtrování atp., jež zmiňuji i ve své práci.

Při spálení RAO je třeba dbát zvýšené pozornosti na produkty spalování, které jsou tím pádem radioaktivní a musí se co nejpečlivěji odfiltrovat. Tyto technologie jsou rovněž zmíněny dále v práci.

2. Radioaktivní odpad

Jedná se o odpad, který vyzařuje radioaktivní záření alfa, beta či gama. Musí ovšem splňovat i další podmínku. Vlastník odpadu potvrdí, že se skutečně jedná o odpad. Například vyhořelé palivo, je možné znovu použít jako druhotný zdroj energie pro jaderné elektrárny s tzv. rychlými reaktory. Vzniká ve zdravotnictví, jaderné energetice, výzkumu a průmyslu. V ČR se v činnosti obou jaderných elektráren vyprodukuje asi 3000 tun RAO. Vysokoaktivní odpad představuje vyhořelé palivo, jež se v našich podmínkách nepřepracovává, ale skladuje v dočasných skladech, než se umístí do dlouhodobých hlubinných úložišť.

2.1. Klasifikace odpadů dle radioaktivity

2.1.1. Přechodné odpady

Jedná se o odpady, jež mohou být skladovány do vymření (možné i v řádech několika let), s pozdější recyklací či uvedení do životního prostředí. Jsou to odpady s krátkou dobou poločasu rozpadu radionuklidů (100 dní). Tyto odpady vznikají ve výzkumech, jako je medicínský nebo průmyslový.

2.1.2. Velmi nízko aktivní odpady

Za takový odpad se považuje např. zbytky po těžbě radioaktivních surovin, kontaminovaná zemina, slabě kontaminované předměty z jaderných elektráren i např. zdiva z vyřazených jaderných elektráren. Tyto odpady lze skladovat spolu s neradioaktivními.

2.1.3. Nízko aktivní odpady

Za nízkoaktivní označujeme radioaktivní odpad obsahující radionuklidy v malém množství. Při manipulaci a přepravě nevyžaduje stínění ani chlazení a může být trvale uložen v úložišti povrchového typu s inženýrskými bariérami. Jako hranice se užívá hodnota povrchové efektivní dávky 2mSv/h.

2.1.4. Středně aktivní odpady

Za středně aktivní označujeme odpad, který nemůže být zařazen do kategorie nízkoaktivního odpadu a zároveň nevyžaduje speciální zacházení jako vysokoaktivní odpad. Při manipulaci a přepravě středně aktivního odpadu je nutné stínění, ale uvolňované teplo je malé. Odpady vyžadují trvalé uložení v hlubinném geologickém úložišti, v některých případech je možné použít úložiště povrchového typu.

2.1.5. Vysokoaktivní

Označujeme odpad, např. vyhořelé jaderné palivo, je vysoce radioaktivní a uvolňuje značné množství tepla - vyžaduje chlazení a stínění. Trvalé uložení je možné pouze v hlubinném geologickém úložišti.

2.2. Dělení odpadu dle skupenství

2.2.1. Plynné odpady

Během provozu jaderné elektrárny vznikají plynné radioaktivní látky ve formě drobných částecí a aerosolů. Jde o halogeny, radon, jód, tritium a uhlík ^{14}C . Plynné odpady se nespalují, jelikož mají krátký poločas rozpadu, v řádu několika dní. Zachytí se účinnými HEPA filtry a podrží se ve speciálních zachycovacích nádržích. Po té co radioaktivita poklesne na bezpečnou úroveň, plyn se vypustí do atmosféry za doprovodu přísných bezpečnostních opatření.

2.2.2. Kapalně odpady

V závislosti na typu reaktoru vznikají kapalně odpady, které se liší jak množstvím, tak aktivitou. Například reaktory chlazené a moderované vodou produkují více kapalných odpadů než reaktory chlazené plynem. Kapalně radioaktivní odpady vznikají při čištění primárního chladiva, bazénů pro skladování vyhořelého paliva, drenážních vod, oplachových vod apod. Vznikají také při údržbě a opravách. Do skupiny mokrých pevných odpadů patří i použité ionexové pryskyřice z iontoměničových filtrů, nasycené náplně filtrů a filtrační kaly. Největší množství těchto

odpadů představují ionexové pryskyřice. Hlavním cílem zpracování kapalných radioaktivních odpadů je takové snížení obsahu radionuklidů, aby bylo možné převážnou část těchto odpadů buď bezpečně vypustit do životního prostředí, nebo důležité složky z nich znovu použít. Pro zpracování kapalných, ale nehořlavých radioaktivních odpadů se používají jiné postupy.

Spalování kapalného odpadu se provádí spolu se spalováním pevného v daných poměrech. Jedná se o oleje, mazadla nebo rozpouštědla. Tyto různorodé kapaliny jsou shromažďovány v nádržích, kde se trvale promíchávají, kvůli homogenizaci. Takto promíchaná směs ovšem není ideální, proto při spalování je nutná přísná regulace dávkování do spalovací pece. Je to z důvodu rozdílných výhřevností.

2.2.3. Pevné odpady

Při provozu jaderné elektrárny vznikají též různé suché pevné odpady obsahující radioaktivní materiály. Patří mezi ně různé kontaminované látky a předměty z provozních, revizních, ale nejčastěji údržbových a opravárenských činností. Jsou to papír, pryž, textil, dřevo, sklo, plasty, izolační materiály, náplně filtrů, drobný kovový odpad a také různé aktivované součástky a zařízení. Pevné radioaktivní odpady se obvykle člení do 4 kategorií: spalitelné, nespalitelné, lisovatelné a nelisovatelné. V praxi se využívá následující postup. Je-li odpad lisovatelný, slisuje se. Uloží se do 200 litrových sudů, a pokud je spalitelný tak se spálí. Průřez sudem s typem odpadu, který se nejčastěji spaluje, si můžeme prohlédnout na [obr. 1]



Obr. 1

3. Spalování radioaktivních odpadů

Proč vůbec spalovat odpad? Protože RAO uvolňuje nebezpečná záření, musí se vytrifikovat, tedy zalít do skla anebo cementovat tj. zalít do betonu. Navíc se i takto "zabezpečené" odpady musí skladovat v dlouhodobých skladech, jelikož poločas rozpadu jen u nízkoaktivních odpadů je v řádech stovek let. Tyto sklady mají omezené kapacity. Snahou, tedy je maximální objemová redukce těchto odpadů. Nejlepším způsobem je tedy jeho spálení, které nabízí až 90% redukci z původního objemu. Další výhodou je homogenizace a chemická stálost popela vzniklého spálením odpadu.

3.1. Způsoby spalování RAO

Firma NUKEM navrhla vysoce spolehlivé a účelové spalovny RAO jež splňují velice příznivá kritéria:

- vysoký dekontaminační činitel
- předčištění odpadu není požadováno
- nepřetržitý provoz
- žádná tvorba strusky ve spalovací peci
- kapalný odpad a pryskyřice můžou být spalovány spolu s pevným odpadem v šachtě spalovací pece
- zpracování radioaktivního odpadu

Takto navržená spalovna (NUKEM), je schopna pružně reagovat na různé vlastnosti a druhy spalovaného materiálu. Umožňuje zpracovat odpad (kontaminované oleje, organické rozpouštědla atd.) současně s pevným odpadem. Požadavky pevného odpadu upravené pro spalovnu NUKEM (tabulka.1)

Charakteristika pevného odpadu	Typický rozsah	Požadavky NUKEM spalování odpadu
Husota	140 -250 kg/m ³	
Výhřevnost	15-30 MJ/kg	10-30MJ/kg
Specifická aktivita β, γ	10^7 - 10^{10} Bq/ m ³	více jak 10^{12} Bq/ m ³
Specifická aktivita α	0 - 10^5 Bq/ m ³	$<10^7$ Bq/ m ³ střední hodnota ii)
Dřevo	5-50% hmotnosti	0-100% hmotnosti
Celulóza, papír	10-50% hmotnosti	0-100% hmotnosti
Textil, oblečení	1-50% hmotnosti	0-100% hmotnosti
Guma	0-5% hmotnosti	0-20% hmotnosti
Nehalogenové uhlovodíky	20-55% hmotnosti	0-60% hmotnosti
Halogenové uhlovodíky	0,5-5% hmotnosti	0-10% hmotnosti
Odpadní pryskyřice	0-8% hmotnosti	0-20% hmotnosti
Nehořlavý/nespalitel ný materiál	0,1-5% hmotnosti	0-5% hmotnosti i)

Tabulka 1

i) horní hranice je vedena pouze ekonomickými úvahami. Nejdelší velikosti kovové části by měla být nižší než 200 mm.

ii) při specifické α -aktivitě vyšší než $5 \cdot 10^7$ Bq/m³, spalovací zařízení musí být vybaveno speciálními funkcemi, aby mohli zpracovat takto kontaminovaný odpad

Horní limit je řízen pouze ekonomickou úvahou. Nejdelší velikost kovových součástí by měla být nižší než 200mm.

Při charakteristické radioaktivitě vyšší než $5 \cdot 10^7$ Bq/m³ spalovací zařízení musí být vybaveno speciálními funkcemi, aby mohlo zpracovávat tento radioaktivní odpad.

Zpracovat odpad s charakteristickou radioaktivitou vyšší než $5 \cdot 10^7 \text{ Bq/m}^3$ musí vyhovět vyšším požadavkům neprodyšnosti pro některá vybavení.

Na příklad:

Příjem odpadu a vysypávání odpadu musí být vybaveno dvojitým víkem. Dále ještě plnicí systém odpadu, horní části spalovací pece a dohořivací komora jsou ve vzduchotěsném obalu.

3.2. Spalovací pec

Spalovací pec je hřídelového typu bez vnitřních částí [obr.2]. Plnění pevného odpadu je prováděno z vrchu spalovací pece. Odpad padá na dno. Dno spalovací pece je vybaveno žáruvzdornou klapkou, z důvodu vysypávání popela. Spalovací vzduch je dodáván ventilátorem, který je čištěn přes HEPA filtr. Tento filtr slouží jako ochrana okolí v případě možného přetlaku a podmínek v instalaci systému. Spalování odpadu se koná ve dvou zónách, do každé dodává spalovací vzduch samostatný ventilátor.



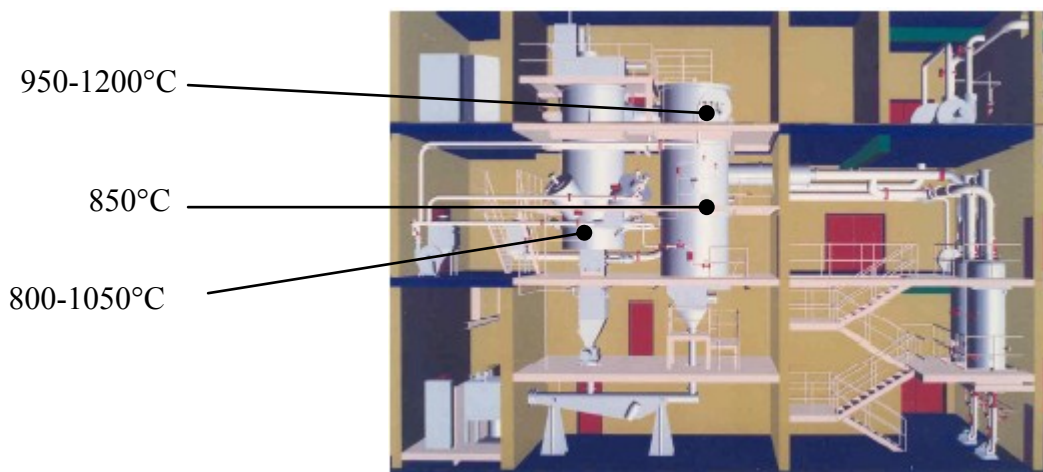
Obr. 2

3.3. Podmínky spalování

Pevný odpad je spalován v nižší zóně, těsně nad dnem spalovací pece a podporován vzduchovou směsí páry. Třetina z celkového průtoku spalovacího vzduchu se používá pro nižší spalovací zónu. Ta je ohřátá na 130°C elektrickým ohřívacem a míchána s párou před vstoupením do spalovací pece. Proudění páry je kontrolováno v zájmu zachování koncentrace kyslíku kolem 16% ve vzduchové směsi páry. Tím je zajištěna horní hranice pro teplotu asi 900°C spalovaného materiálu. V důsledku toho

je tvorba strusky vyloučena a usazování strusky na stěnách spalovací pece je do značné míry zabráněno. Zbytek proudícího spalovacího vzduchu je přivedeno do druhé zóny přímo nad spalování odpadu. Toto proudění vzduchu obsahuje stechiometrické množství kyslíku, je upravena pro dosažení spalovací teploty mezi 800-1050°C. Před zahájením spalování se pec předeřeje na 750°C hořákem na topný olej (či jinými typy hořáků) umístěným na stěně spalovací pece. Hořák na topný olej je v provozu pouze na začátku topné fáze nebo když odpad nemá dostatečně vysokou výhřevnost. Když kapalný odpad je spalován současně s pevným odpadem, hořlavý kapalný odpad nahrazuje topný olej a hořák je přepnut do provozu na kapalný odpad. Spaliny opouštějící spalovací pec, stále obsahují hořlavé plynné složky a pevné částice. Ty budou spáleny v dohořivací komoře. Koncentrace kyslíku v dohořivací komoře je kontrolována a udržována alespoň na 6%. Přídavné spalování topného oleje udržuje teplotu v dohořivací komoře mezi 950 a 1200°C. Teplotní rozsah společně s dobou setrvání spalin v dohořivací komoře více než 2 sekundy, zajišťuje zánik všech organických sloučenin. Teplota spalin v dohořivací komoře je snížena na 850°C vstřikováním vody. Teplotní schéma jsem naznačil na [obr.3] na schématu spalovacího zařízení

Toto zpracování zajišťuje, že část popela, která by mohla být zkapalněna v horní části komory, se usadí v tuhém stavu na dně dohořivací komory.



Obr. 3

4. Cesta spalin

Horké spaliny (850°C) opouštějí dohořivací komoru a jsou ochlazovány na 300°C ve dvojité ochlazovací trubici [obr.4], které jsou chlazeny z venku čerstvým vzduchem dodávaným ventilátorem. Druh ochlazovacího procesu uvádí výhody udržení objemu spalin na minimu. Mimoto rekuperované teplo se používá v dalších krocích procesu.

Po chlazení, spaliny jsou filtrovány skrz kovový vláknitý filtr částice, kde je asi 95% popílku odstraněno a sbíráno z podkladu filtru. Částice kovového vláknitého filtru jsou pravidelně profukovány stlačeným vzduchem. Pravidelnost je kontrolována poklesem tlaku ve filtru.

Filtrované spaliny opouštějí vláknitý filtr jsou prány v zpětném proudu pračky. Hodnota Ph odsiřovacího roztoku v pračce, zůstává v rozsahu 5-9 a je udržována automaticky dávkováním hydroxidu sodného. Odsiřovací roztoky cirkulují v uzavřeném cyklu a jsou ochlazeny na 50°C ve vodou chlazeném výměníku tepla.

Použitý čistící roztok je vypuštěn pro další zpracování, jakmile je obsah soli v rozsahu 10-15 hmotnostních %. Předpokládá se možnost, že zařízení cementace je již na místě, ve kterém se odsiřovací roztoky mohou upravovat. Složení odsiřovacího roztoku je velmi podobné u obou možností čištění spalin. Druhá varianta obsahuje méně popílku díky filtraci spalin, a proto bude mít nižší specifickou aktivitu.

Popel sbíraný v kovovém vláknitém filtru je vysypáván jednou týdně spolu s popelem z dohořivací komory a je přepraven vibračním dopravníkem do společných kontejnerů s popelem.



Obr. 4

5. Čištění spalín

Spaliny obsahují nebezpečné složky, které musí být odstraněny. Mezi ně patří HCl, HF, SO₂, NO_x,

Těžké kovy a radionuklidy. Ty budou eliminovány ze spalín v postupných krocích procesu. Emisní limity stanovené Evropskou unií jsou uvedené v [tabulce 3]

	Průměrné hodnoty v jednom dni	Průměrné hodnoty za půl hodiny
Prach	10 mg/Nm ³	30 mg/Nm ³
Organické sloučeniny (celkový uhlík)	10 mg/Nm ³	20 mg/Nm ³
Plynné chlorované organické sloučeniny (HCl)	10 mg/Nm ³	10 mg/Nm ³
Plynné anorganické fluorovaných sloučeniny (HF)	1 mg/Nm ³	4 mg/Nm ³
Oxidy síry (SO ₂)	50 mg/Nm ³	200 mg/Nm ³
Oxidy dusíku jako (NO ₂)	200 mg/Nm ³ i)	400 mg/Nm ³ i)
Oxid uhelnatý (CO)	50 mg/Nm ³	100 mg/Nm ³ ii)
Průměrné hodnoty při odběrech		
Kadmium, Thalium celkově	0,05 mg/Nm ³	
Rtuť	0,05 mg/Nm ³	
Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn celkové	0,5 mg/Nm ³	
Dioxiny, furany (pro stanovené sloučeniny)	0,1 ng/Nm ³ i)	

Tabulka 2

(Vypočtené pro standardní podmínky a suchý plyn na 11% O₂)

i) stanovené emisní limity pro tyto látky mohou být garantovány pouze pro variantu mokrého čištění spalín bez využití tepla

ii) nebo 150 mg/m_N^3 jako průměrná hodnota 95% všech denních měření provedených každých 10 minut

Horké spaliny (850°C) opouštějící dohořivací komoru, jsou rapidně ochlazeny na 250°C v statickém míchacím zařízení, mícháním čerstvého vzduchu nebo v dalším ochlazovacím procesu vstřikování vody.

Příznivý teplotní rozsah pro utváření polychlorovaných dibenzodioxinů (PCDD) a dibenzofuranů (PCDF) je mezi 600°C a 300°C . A rychlým ochlazením pod 300°C podstatně snížíme tvorbu těchto nebezpečných složek. Poté jsou ochlazené spaliny prány ve dvou postupných krocích. Provozní parametry tryskových praček jsou nastaveny na velmi účinné pohlcování nebezpečných sloučenin. Hodnota pH čistícího roztoku v první tryskové pračce je udržována mezi 0,5 a 1,5 přidáním hydroxidu sodného. Hodnota pH čistícího roztoku v druhé tryskové pračce je regulována mezi 7 a 9 rovněž za pomoci hydroxidu sodného. Rozsah PH je vybrán pro nejvyšší možnou absorpci SO_2 a také minimalizováním podílu CO_2 ve spalínách. Čistící roztoky pro obě pračky plynu, cirkulují v uzavřeném obvodu, pomocí speciálních čerpadel. Použité čistící roztoky budou vypuštěny v dávkách pro pozdější úpravy.

5.1. Sušení odsiřovacích roztoků

(pouze, když proces cementování není vhodný)

Použitý čistící roztok má různé chemické složení, záležející na obsahu gumy, halogenovaných plastů a pryskyřice ve spalovaném odpadu. Typické složení je:

NaCl	10 až 15% hmotnostních
Na_2SO_4	1 až 2% hmotnostních
Těžké kovy	nestálé množství
Hodnota Ph	6 až 9

Popílek	10 až 50 g/l
Charakteristická radioaktivita	10^7 až 10^{10} Bq/m ³

Odsiřovací roztok je vypuštěn v dávkách z praček do nádrže. Nádrž je vybavena míchadlem, aby se zabránilo usazování pevných částí. Snížení objemu odsiřovacího roztoku je dosaženo sušením ve fluidní vrstvě reaktoru. Sušící teplota je udržována vedlejším proudem horkých spalin v rozsahu 150-200°C.

Teplota vycházejícího plynu je v rozsahu 80 -100°C .Tento plyn je veden do trysek pračky proti proudu toku spalin. Usušený produkt ve tvaru granulované soli je v dávkách vysypán do 200 litrových sudů (na příklad společně s popelem tvořeným ve spalovací peci). Obsah vody v soli je méně jak 1% hmotnostních. Množství odsiřovacího roztoku je přes tyto sušící jednotky v rozsahu 25-50 kg/h. Provozní režim je stejný jako pro spalovací zařízení tj. 24 h/denně.

5.2.Jemná filtrace

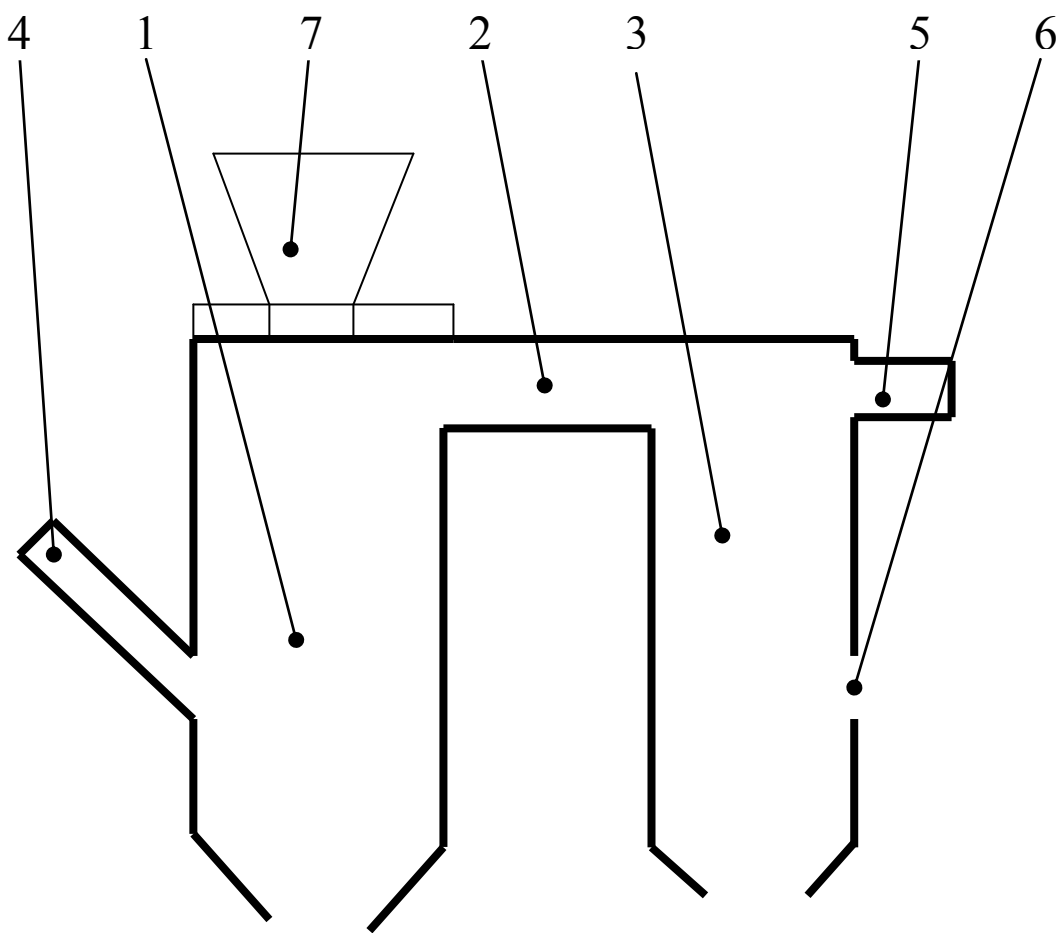
Odpadní plyn z reaktoru z druhého zpětného proudu pračky plynu, který je již zbaven mnoha nebezpečných složek, prochází částicovým filtrem (HEPA-filtr), kde jsou pevné částice zachyceny s účinností vyšší než 99,9%. Tento filtr pevných částic tvoří poslední bariéru pro netěkavé radionuklidy. Je nainstalován ve dvojici, kvůli kontinuálnímu provozu zařízení. Zabráňuje úniku do okolí např. kvůli přílišnému zvýšení tlaku jednoho filtrů. Aby se zabránilo kondenzaci vody v částicovém filtru, teplota odpadního plynu se zvyšuje na 30°C nad rosný bod a to ve statickém míchadle před filtrací. Zvýšení teploty je dosaženo recyklačními podíly odpadního plynu z reaktoru skrz elektrický ohřívač.

Údržba podtlaku

Systém udržování podtlaku uvnitř spalovacího zařízení se skládá ze dvou dmychadel. Hlavní dmychadlo udržuje podtlak během normálního provozu. Menší pomocné dmychadlo se nicméně používá během přerušení spalovacího procesu nebo

v pohotovostním režimu na víkend. Podtlak je udržován konstantně pomocí regulace otáček hnacího motoru.

Schéma dohořívací komory



Obr. 5

1. Oblast spalování (1.tah)
2. Kouřovod
3. Dohořívací komora (2.tah)
4. Hořák H1
5. Hořák H2
6. Odvod spalin
7. Výsypka odpadu

6. Výpočty

Zadání: Výkon spalovny 50kg/hod

Výhřevnost paliva volím 20 MJ/kg (z daného rozmezí 15-35MJ/kg)

Doplňující zadání: Teplota spalin v dohořivací komoře 1000°C

Přivedená energie v palivu

$$P_P = \dot{m}_p \cdot Q_{i,o}^r = 0,014 \cdot 20 = 0,28 \text{ MW} \quad (6.1)$$

$$\dot{m}_p = 50 \frac{\text{kg}}{\text{hod}} = 50 \frac{\text{kg}}{3600\text{s}} = 0,014 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

6.1. Stechiometrické výpočty

6.1.1. Minimální objem spalovacího vzduchu suchého

$$V_{vz.min}^S = 0,5 + 1,012 \cdot \frac{Q_{i,o}^r}{4187} = 0,5 + 1,012 \cdot \frac{20\,000}{4187} = 5,334 \frac{\text{m}_N^3}{\text{kg}} \quad (6.1.1)$$

Pro výpočet minimálního suchého vzduchu jsem použil Rosinovy vztahy pro pevná paliva. Tento výpočet je pouze přibližný, ovšem s dostatečnou přesností pro návrh. Číslo 4187 je přepočet skupenského tepla vody.[14]

6.1.2. Minimální objem spalovacího vzduchu vlhkého

$$V_{vz.min}^V = V_{vz.min}^S \cdot v = 5,334 \cdot 1,05 = 5,601 \frac{\text{m}_N^3}{\text{kg}} \quad (6.1.2)$$

v -volím součinitel vlhkosti 1,05

6.1.3. Minimální objem spalin suchých

$$V_{sp.min}^S = 1,375 + 0,95 \cdot \frac{Q_{i,o}^r}{4187} = 1,375 + 0,95 \cdot \frac{20\,000}{4187} = 5,913 \frac{\text{m}_N^3}{\text{kg}} \quad (6.1.3)$$

Pro výpočet suchých spalin jsem rovněž použil Rosinových vztahů pro pevná paliva.[14]

6.1.4. Množství vody ve spalínách

Pro výpočet je třeba zahrnout množství vody a vodíku obsažené v palivu. Toto stanovování je v praxi velice obtížné, jelikož vlhkost se v odpadu pohybuje ve velkém rozsahu.

Volím $W^r=25\%$, $H^r=15\%$

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{2} \cdot H^r + \frac{22,4}{18} \cdot W^r + (v - 1) \cdot V_{vz.min}^s \quad (6.1.4)$$

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{2} \cdot 0,15 + \frac{22,4}{18} \cdot 0,25 + (1,05 - 1) \cdot 5,334 = 2,258 \frac{m_N^3}{kg}$$

6.1.5. Minimální objem spalin vlhkých

$$V_{SP.min}^V = V_{SP.min}^s + V_{H_2O} = 5,913 + 2,258 = 8,171 \frac{m_N^3}{kg} \quad (6.1.5)$$

6.1.6. Skutečný objem spalovacího vzduchu

$$V_{vz.sk}^V = V_{vz.min}^V \cdot n = 5,601 \cdot 2,2 = 12,322 \frac{m_N^3}{kg} \quad (6.1.6)$$

n-přebytek vzduchu volím 2,2 dle praktických výpočtů spaloven z literatury [4]

6.1.7. Skutečný objem spalin vlhkých

$$V_{SP.sk}^V = V_{SP.min}^V + (n - 1) \cdot V_{vz.min}^V = 8,171 + (2,2 - 1) \cdot 5,601 \quad (6.1.7)$$

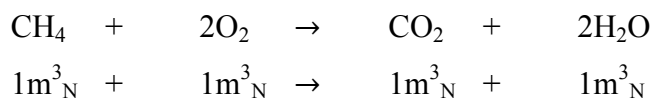
$$V_{SP.sk}^V = 16,236 \frac{m_N^3}{kg}$$

6.1.8. Objemový tok spalin

$$\dot{V}_{sp,o} = V_{SP.sk}^V \cdot \dot{m}_p = 16,236 \cdot 50 = 811,8 \frac{m_N^3}{hod} = 0,226 \frac{m_N^3}{s} \quad (6.1.8)$$

6.1.9. Spalování zemního plynu

Předpokládám spalování ruského zemního plynu o výhřevnosti $Q_{i,p}^r=34\,080$ KJ/kg a procentuálním složení metanu $CH_4=98,4\%$



$$V_{O_2} = 2 \cdot CH_4 = 2 \cdot 0,984 = 1,968 \frac{m_N^3}{m_N^3} \quad (6.1.9)$$

6.1.10. Minimální objem spalovacího vzduchu pro plyn

$$V_{vz,min,p}^s = \frac{V_{O_2}}{0,21} = \frac{1,968}{0,21} = 9,37 \frac{m_N^3}{m_N^3} \quad (6.1.10)$$

6.1.11. Množství jednotlivých složek spalin

$$V_{H_2O,p} = 2 \cdot CH_4 + V_{vz,min,p}^s \cdot (v - 1) \quad (6.1.11a)$$

$$V_{H_2O,p} = 2 \cdot 0,984 + 9,37 \cdot (1,05 - 1) = 1,968 \frac{m_N^3}{m_N^3} \quad (6.1.11b)$$

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot V_{vz,min,p}^s = 0,79 \cdot 9,37 = 7,402 \frac{m_N^3}{m_N^3} \quad (6.1.11c)$$

$$V_{CO_2} = 1 \cdot CH_4 = 1 \cdot 0,974 = 0,974 \frac{m_N^3}{m_N^3} \quad (6.1.11d)$$

6.1.12. Minimální množství spalin ze spalování plynu

$$V_{sp,min,p}^v = V_{N_2} + V_{H_2O} + V_{CO_2} = 7,402 + 1,968 + 0,974 = 10,344 \frac{m_N^3}{m_N^3} \quad (6.1.12)$$

6.1.13. Skutečný objem spalin ze spalování zemního plynu

$$V_{sp,sk,p}^v = V_{sp,min,p}^v \cdot n_p = 10,344 \cdot 1,05 = 10,861 \frac{m_N^3}{m_N^3} \quad (6.1.13)$$

přebytek vzduchu pro plyn volím 1,05 z daného rozsahu pro spalování plynného paliva $n(1 \text{ až } 1,1)$

6.1.14. Objemový tok spalin ze spalování plynu

$$\dot{V}_{sp,p}^v = \dot{V}_{ZP} \cdot V_{sp,sk,p}^v = 45 \cdot 10,861 = 488,745 \frac{m_N^3}{\text{hod}} = 0,136 \frac{m_N^3}{s} \quad (6.1.14)$$

\dot{V}_{ZP} -objemový tok zemního plynu do hořáku(o výkonu 350kW) je volený $45 \frac{m_N^3}{\text{hod}}$ k vytvoření teploty 1200°C v dohořivací komoře

6.2. Průtoky spalin a vzduchů spalovací peci

6.2.1. Průtok Spalovací komorou

$$\dot{V}_{vz,SK} = \dot{m}_p \cdot n_{sk} \cdot V_{vz,min}^s = 50 \cdot 1 \cdot 5,334 = 266,7 \frac{m_N^3}{\text{hod}} = 0,074 \frac{m_N^3}{s} \quad (6.2.1)$$

pro stechiometrické spalování ve spalovací komoře volím přebytek vzduchu $n_{sk}=1$

6.2.2. Průtok dohořivací komorou

$$\dot{V}_{vz,DK} = \dot{m}_p \cdot n_{dk} \cdot V_{vz,min}^s \cdot 0,25 = 50 \cdot 1,5 \cdot 5,334 \cdot 0,25 = 100,013 \frac{m_N^3}{hod} \quad (6.2.2)$$

$$\dot{V}_{vz,DK} = 0,028 \frac{m_N^3}{s}$$

přebytek vzduchu v dohořivací komoře volím 1,5 dle zkušeností z návrhu v literaturách [4]

koeficient 0,25 nám přepočítává daný tok pro 25% odpadu

6.2.3. Celkový průtočný objem spalovací pecí

$$\dot{V}_{vz,celk} = \dot{m}_p \cdot n_{celk} \cdot V_{vz,min}^s = 50 \cdot 2,2 \cdot 5,334 \quad (6.2.3)$$

$$\dot{V}_{vz,celk} = 586,74 \frac{m_N^3}{hod} = 0,163 \frac{m_N^3}{s}$$

6.2.4. Průtočné objemy v obou komorách

$$\dot{V}_{vz,sk+dk} = \dot{V}_{vz,sk} + \dot{V}_{vz,dk} = 266,7 + 100,13 \quad (6.2.4)$$

$$\dot{V}_{vz,sk+dk} = 366,83 \frac{m_N^3}{hod} = 0,102 \frac{m_N^3}{s}$$

6.2.5. Směšovač

$$\dot{V}_{vz,směs} = \dot{V}_{vz,celk} - \dot{V}_{vz,sk+dk} = 586,74 - 366,83 \quad (6.2.5)$$

$$\dot{V}_{vz,směs} = 219,91 \frac{m_N^3}{hod} = 0,061 \frac{m_N^3}{s}$$

6.2.6. Průtočné objemy vlhkých spalín

$$\dot{V}_{sp,celk}^V = \dot{V}_{sp,p}^V + \dot{V}_{sp,o}^V = 488,745 + 811,8 \quad (6.2.6)$$

$$\dot{V}_{sp,celk}^V = 1300,545 \frac{m_N^3}{hod} = 0,361 \frac{m_N^3}{s}$$

6.2.7. Objem spalín v dohořivací komoře

$$\dot{V}_{sp} = \dot{V}_{sp,celk}^V \cdot \frac{T_{sp}}{T_N} = 1300,545 \cdot \frac{1273}{273} \quad (6.2.7)$$

$$\dot{V}_{sp} = 6064,446 \frac{m^3}{hod} = 1,685 \frac{m^3}{s}$$

teplota spalin v dohořivací komoře ze zadání $T_{sp}=1000^{\circ}\text{C}=1273\text{K}$

teplota normální $T_N=0^{\circ}\text{C}=273\text{K}$

6.3. Návrh velikosti dohořivací komory

6.3.1. Rozměry dohořivací komory

$d=1,7\text{m}$

$v=1,5\text{m}$

d - průměr dohořivací komory

v -výška dohořivací komory

6.3.2. Objem dohořivací komory

$$V_{dk} = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot v = \frac{\pi}{4} \cdot 1,7^2 \cdot 1,5 = 3,405\text{m}^3 \quad (6.3.2)$$

6.3.3. Zdržení spalin dohořivací komoře

$$\tau_{sp} = \frac{V_{dk}}{\dot{V}_{sp}} = \frac{3,405}{1,685} = 2,02\text{s} \quad (6.3.3)$$

podmínka správnosti návrhu dohořivací komory je zdržení spalin v dohořivací komoře větší, jak 2s což v našem případě vyšlo

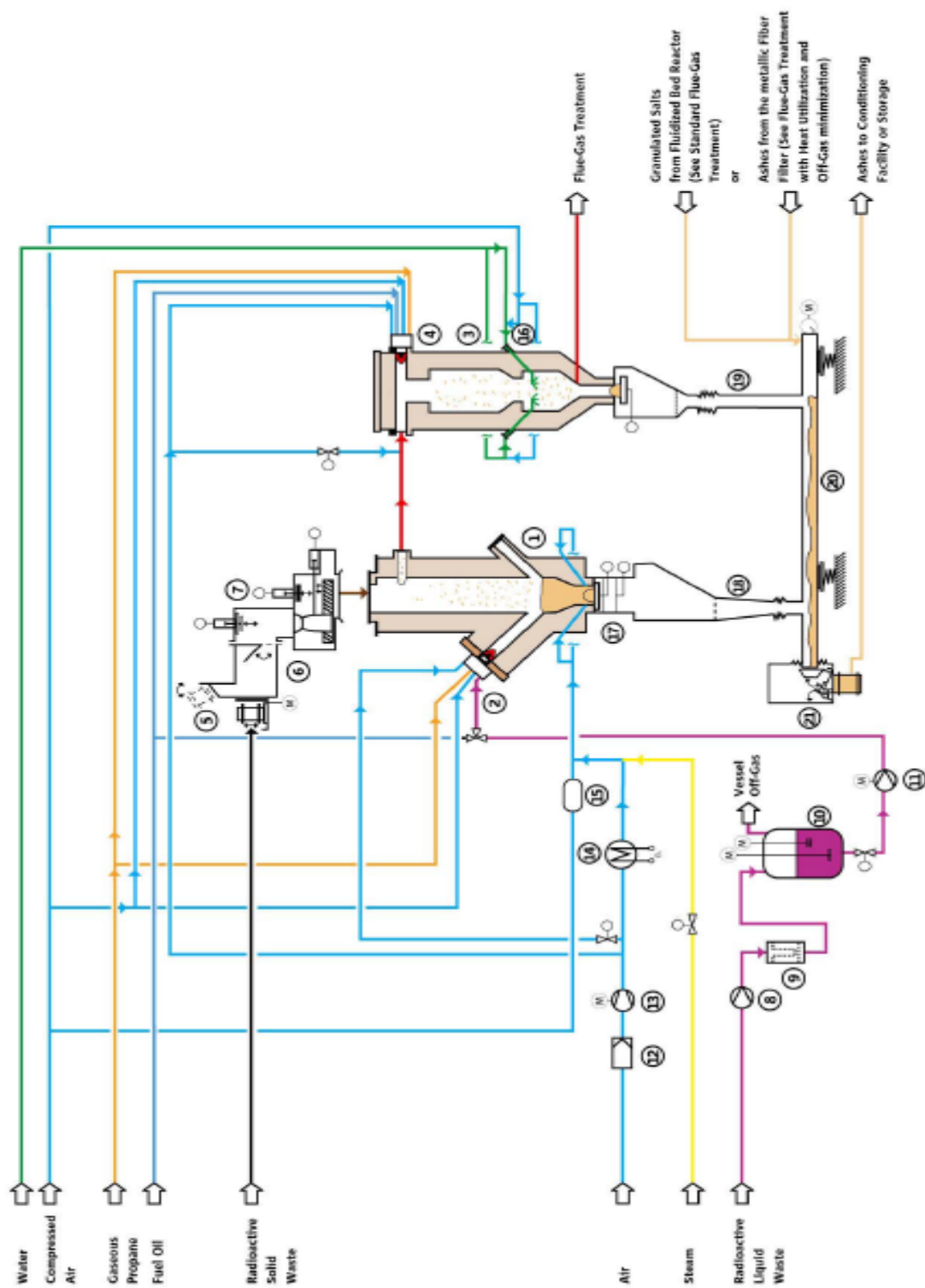
7. Závěr

V mé práci tedy spracovávám spalování radioaktivních odpadů. Konkrétněji se zabývám koncepcí firmy NUKEM, která má dlouholeté zkušenosti v oboru a tuto problematiku úspěšně zvládá.

Cílem mé práce bylo navrhnout dohořivací komoru, ke spalovně radioaktivních odpadů o výkonu spalovny 50kg/hod se zadaným rozsahem výhřevností odpadu, v němž jsem zvolil výhřevnost 20MJ/kg. Spalovací komora (tedy 1.fáze spalování) je opatřena hořákem, který funguje jak na zemní plyn, tak na kapalný odpad jenž se spaluje zároveň s pevným. Dohořivací komora je vybavena stabilizačním hořákem, (o výkonu 350kW) jenž udržuje teplotu 1200°C. Obě komory jsou spojeny kouřovodem. Správný návrh dohořivací komory má zaručit setrvání spalin nejméně 2s. Návrh by měl zaručovat setrvání 2,02 sec. Rozměry hřidelovitě koncipované dohořivací komory vyšly Ø1,7m o výšce 1,5m.

Popisek k [příloze A,C]

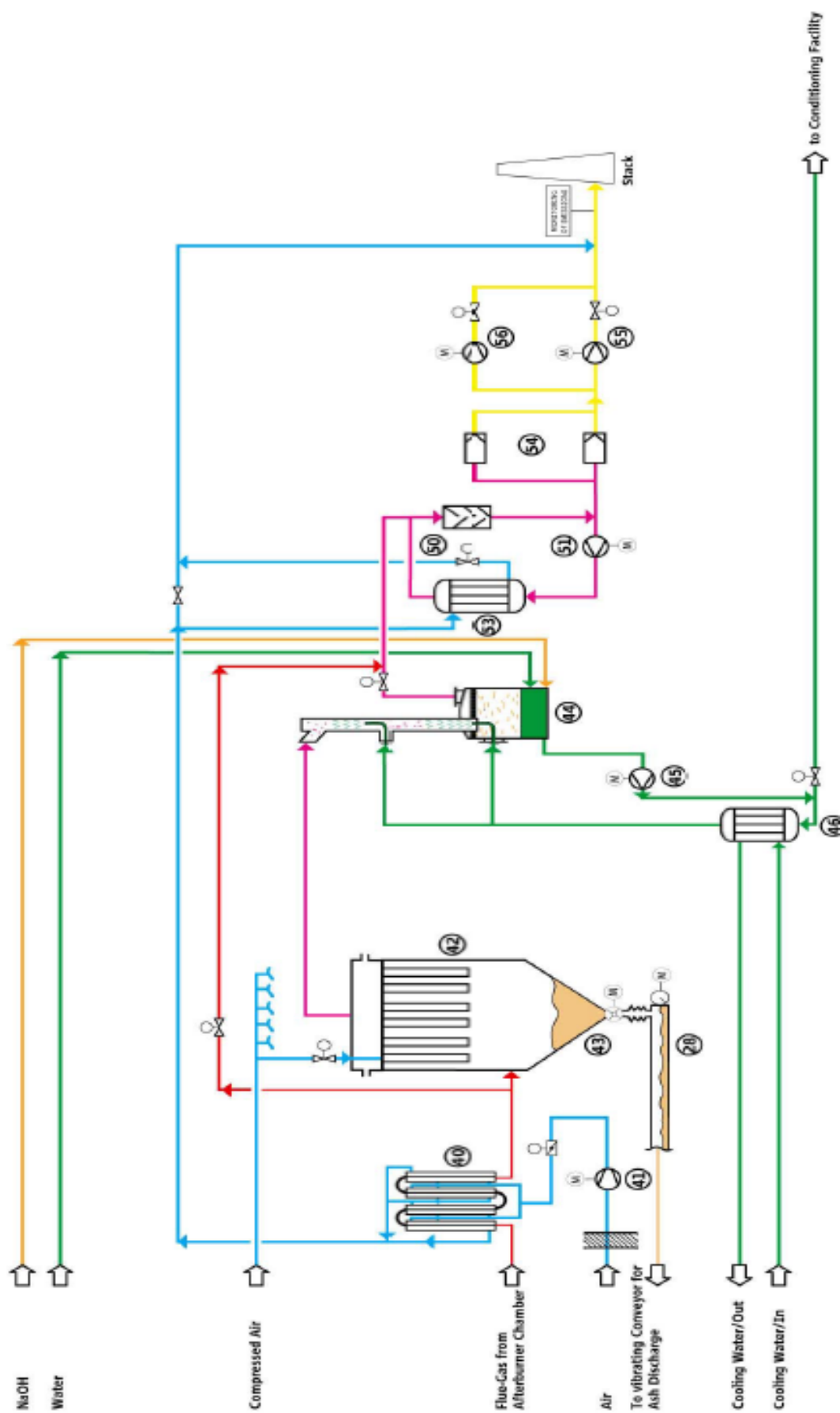
14.Topné těleso, 22.Statické míchací zařízení, 23,25,44.Pračka se zpětným proudem, 24,26,45 oběhové čerpadlo, 27.Filtr, 28.Čisticí roztok přijímací nádrže, 29.Plnicí čerpadlo, 30.Fluidní vrstva reaktoru, 31.Porézní kotouč, 32.Vírový odprašovač, 33.Ventilátor, 34.Filtr, 40.Chladič plynu, 41.Dmýchadlo, 42.Kovový vláknový filtr, 43.Porézní kotouč, 46.Chladič čisticího roztoku, 50.Statické míchadlo, 51.Oběhový výtlačný ventilátor, 52,58.Elektrické topné těleso, 53,57,Výměník tepla, 54.Hepa filtry, 55.Hlavní dmychadlo, 56.Pomocné dmychadlo, 60.Katalytický reaktor, 59,61.Statické míchadlo



Příloha B

Popisek k [příloze B]

1.Spalovací pec, 2.Hořák, 3.Dohořivací komora, 4.Přídavné spalování, 5.Zařízení naklápěcího bubnu, 6.Přijímací kóje, 7.Plnicí kóje, 8.Čerpadlo, 9.Filtr, 10.Plnicí nádrž s pevným míchadlem a emulzním generátorem, 11.Plnicí čerpadlo, 12.Filtr, 13.Dmýchadlo, 14.Topné těleso, 15.Velké Dmýchadlo, 16.Chlazení hořáku, 17.Chladicí prostor s popelem, 18,19.Vysypávací box s popelem, 20.Vibrační dopravník, 21.Přepravní kóje s popelem



Příloha C

Seznam příloh

[A] Schéma čištění spalin

[B] Schéma spalovací a dohořivací komory

[C] Schéma čištění spalin s využitím tepla

Seznam obrázků

[Obr.1] Průřez 200 l sudem typického složení RAO

[Obr.2] Spalovací komora těsně před transportem

[Obr.3] Schématický průřez spalovnou s vyznačenými teplotami

[Obr.4] Protiproudé tryskové pračky spalin

[Obr.5] Schéma dohořívací komory

Zdroje:

- [1] Zdeněk Dlouhý, Nakládání s radioaktivním a vyhořelým jaderným palivem, Brno.VUTIUM,2009 ISBN 978-80-214-3629-9
- [2] Pavel Kolat- Jiří Tomčala, Likvidace radioaktivních odpadů spalováním, časopis Jaderná energie,1990, vydání 36,č.1
- [3] M.Rybín Spalování paliv a hořlavých odpadů v ohništích průmyslových kotlů.Praha.SNTL-Nakladatelství technické literatury,1985.
- [4] Pavel Kolat: Posudek na spalovnu WSP 100,WSP 250, WSP 500 firma Wasteko a.s. Ostrov n. O. VŠB-TUO 15.7.1999.
- [5] Jaroslav Frantík: Návrh spalovny radioaktivních odpadů, VŠB-TUO, 2008
- [6] Správa úložišť radioaktivních odpadů. [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: www.surao.cz
- [7] Brouchure Incineration. NUKEM. [online]. 2007 [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: www.nukem.de
- [8] Technika a technologie zpracování odpadů. [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: www.odpday.tf.czu.cz
- [9] Nakládání s použitým palivem a odpady z provozu českých jaderných elektráren. [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: www.cez.cz
- [10] <http://www.vutbr.cz>
- [11] <http://richard-1.com>
- [12] <http://www.chernobylee.com>
- [13] <http://www.elearn.vsb.cz>
- [14] <http://www.energyweb.cz>